

基于分区优化的高铁车站通过能力提高方法

李晓娟¹, 杨阳², 韩宝明³, 菅美英^{*1}

(1. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 中国铁路上海局集团有限公司客运部, 上海 200071;
3. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 车站通过能力是铁路能力的一个关键制约点, 本文通过降低咽喉长度对车站作业间隔时间的影响, 扩大高铁车站通过能力. 分析车站分区的划分原则及方法, 研究车站进路关系模型及作业间隔时间的计算方法. 以通过列车数量最大化为目标, 考虑车站作业间隔时间, 不同作业类型列车比例等约束条件, 建立基于分区划分的车站通过能力优化模型及算法. 案例分析表明, 不同作业类型列车比例及组合方式对能力的影响较大, 分区划分车站咽喉区可有效减少列车作业间隔时间, 提高车站通过能力.

关键词: 铁路运输; 通过能力; 分区时间方法; 高速铁路车站; 间隔时间

A Method for Expanding Station Carrying Capacity of High-speed Railway Based on Block Optimization Method

LI Xiao-juan¹, YANG yang², HAN Bao-ming³, JIAN Mei-ying¹

(1. College of Traffic, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 2. Passenger Transport Department, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The station carrying capacity is a key constraint of railway capacity. This paper increases the capacity of a station by reducing the influence of throat length on the interval time between the trains on the station. Based on the analysis of the principles and method of the division of station blocks, the relationship model of train routes and the calculation method of operation interval time are studied. Then, the simulation model and algorithm of station carrying capacity are established. The model takes the maximal number of trains allowed on the station as the objective function, and the model constraints include the interval time, the proportion of different train types, and the buffer time. Finally, a case study on a station verifies the effectiveness of the method. The proposed method in this paper can effectively increase the carrying capacity of high-speed railway stations.

Keywords: railway transportation; carrying capacity; block optimization method; high-speed railway station; headway

0 引言

列车车站作业间隔时间对车站能力的影响非常大, 如何精细化、统一化列车作业间隔时间, 提升车站通过能力有着重要的现实意义. 张岳松^[1]基于CTCS-2/3, 量化了高速铁路列车7种车站间隔时间. 许多学者借鉴国际铁路联盟中提出的铁路

能力计算及评估方法, 使用闭塞分区时间模型和运行图压缩方法分析铁路能力^[2-3]. 此外, 诸多学者通过优化分析法及模拟仿真对铁路车站通过能力进行研究. Hansen^[4]将不同的既有铁路车站能力计算方法应用于德国斯图加特项目中, 如最小间隔时间、利用率、运行图的可靠性等, 并对各方法进

收稿日期: 2020-01-16

修回日期: 2020-03-20

录用日期: 2020-04-01

基金项目: 内蒙古自然科学基金/ Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China(2017BS0501); 内蒙古自治区教育科学研究“十三五”规划课题/The“13th Five Year”Plan of Educational Science Research in Inner Mongolia (NGJGH2018016).

作者简介: 李晓娟(1987-), 女, 内蒙古四子王旗人, 副教授, 博士.

*通信作者: jianmy321@163.com

行模拟验证.Chien^[5]在需求不确定条件下,构建以最小化损失能力为目标的模型,对能力利用进行评估.对于能力提升方法:Burdett^[6]提出了如何扩大铁路理论能力的最优模型;Armstrong^[7]利用场景模拟的方法,研究考虑可靠性等条件下提高车站通过能力的方法;Wang^[8]提出通过有效减少进路锁闭及开放时间,提高车站通过能力的方法.

本文从如何减少车站列车作业间隔时间的角度分析提高高速铁路车站通过能力的方法.基于车站分区优化,有效降低咽喉长度对车站作业间隔时间的影响,提升车站通过能力.基于分区划分的理论,更新列车进路关系及不同间隔时间的计算方法,建立高速铁路车站通过能力计算模型及算法.通过案例设计及分析,证明该方法的实际可应用性.

1 车站分区划分

1.1 分区优化

图1为某车站分区示意图.通常实际通过道岔侧向速度为75 km/h,站内制动减速度为0.5 m/s²,故列车进站后的制动距离为432.6 m,安全防护距离为150 m.本文设置关键分区长度不小于600 m,保证站内列车运行安全.在分区优化前,停站列车需要进入到发线后,后续列车才可进入咽喉区;分区优化后,停站列车经过分区F后,后续列车即可开始进站.分区优化的方法对全站信号机的布设,电路的设置及联锁的逻辑关系等都会造成影响,在既有车站进行改造的成本较大,故可为新线新站的建设提供需求和理论支持,提高车站的作业效率.

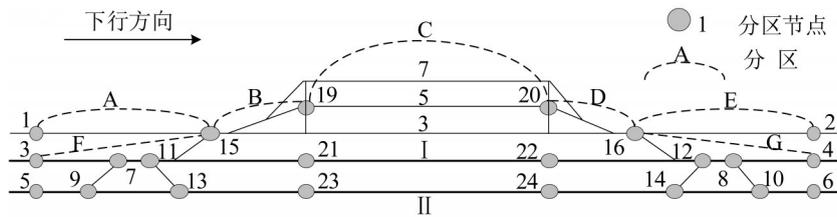


图1 分区及分区节点划分示意图

Fig. 1 Diagram of blocks and block nodes

具体分区划分原则:

- (1) 分区具有连续性,各个分区之间可以满足正常的列车运行.
- (2) 每个分区有且只有一个起始节点和一个终止节点,且该分区内列车运行所经过的路段不能有其他节点.
- (3) 咽喉区两端进站信号机处,在正线、动车段走行线的两个方向分别设置一个分区节点,如图1中节点1,3,5.
- (4) 不同到发线组可被划分为独立的分区,且每个到发线组两端分别设置一个分区节点,如图1中分区节点19和20.
- (5) 对于正线,根据到发线的节点分布,可以将其分为3个分区,两个分区节点分别与到发线两节点在同一垂直线上.
- (6) 两个方向之间的渡线分别为一个单独的分区,称为折返分区,对应的节点为折返分区节点,如图1中分区节点7和9,且折返分区的设置要

充分考虑长道岔的限制.

- (7) 每个到发线组末端节点与相邻咽喉区的最近一个节点组成一个分区,且该分区内除了折返节点之外没有其他节点,如图1中分区B和D.

根据分区的划分,建立分区节点集合 $P = \{p \in Z_s\}$, 分区集合 $S = \{s(p, p') | p, p' \in P, s \in Z_s\}$, 其中, p, p' 分别为分区 s 的开始节点和结束节点. 除列车走行时间,其他时间可设定为固定值 t_f . 同一分区被连续占用的最小间隔时间为

$$I_s = t_f + \frac{D_s}{v_{s,j}}, \quad s \in S \quad (1)$$

式中: I_s 为分区 s 被连续占用的最小间隔时间; D_s 为分区 s 的距离; $v_{s,j}$ 为列车 j 在分区 s 内的平均走行速度.

分区划分具有连续性,一条进路由一组连续分区唯一标定. 车站列车运行进路集合 $R = \{r\{r_s\{s \in S\}, k_r, y_{k,r}\}, y_{k,r} \in Z_s\}$, 其中, r_s 为进路 r 包含的分区集合; k_r 为进路 r 的类型, $k_r = 1, 2, 3$,

4,5,6分别表示始发、终到、停站、通过、下行立折和上行立折列车,该类型与列车作业类型一致; $y_{k,r}$ 为第 k 种类型进路中 r 进路的优先级,用正整数表示,值越大,级别越高.各进路的关系取决于是否包含相同的分区.各分区之间的关联关系由其共同包含的分区或分区节点决定,当某一分区被占用时,其他分区的开始节点与该分区的开始节点相同,或结束节点与该分区的结束节点相同时,对应的分区也将处于被占用状态,即认为该两条进路是有关系的,否则进路被占用时不产生冲突.

1.2 间隔时间计算

(1) 到达间隔时间.

分区划分后,列车制动的目标距离和目标速度发生改变.目标点设置为第一个分区结束节点处,如图2所示.列车到达间隔时间为

$$\tau_r^{(a)} = \frac{v_c - v_o}{a_1} + \frac{D_{r,s}}{0.5(v_c + v_x)} + \frac{D_p}{v_c} + \frac{D_1}{v_x} + t_{aa} \quad (2)$$

式中: $\tau_r^{(a)}$ 为车站最小到达间隔时间; a_1 为列车在区间内的减速度; D_1 、 $D_{r,s}$ 、 D_p 分别为列车长度,所占用进路 r 的第一个分区 s 的长度及安全防护距离; v_o 、 v_c 、 v_x 分别为列车开始制动时速度、列车通过道岔的限制速度和列车经过第一个分区结束节点的目标速度; t_{aa} 为列车到达附加时间,取值 36 s.

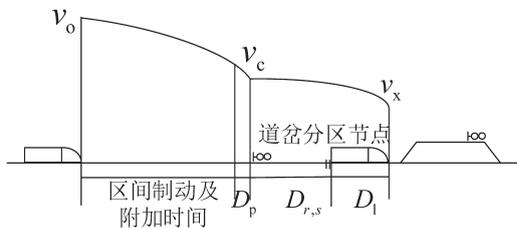


图2 列车到达间隔距离示意图

Fig. 2 Arrival interval distance after block division

(2) 发车间隔时间.

分区划分后列车发车间隔距离如图3所示.列车发车间隔时间为

$$\tau_r^{(d)} = \frac{D_{r,s'} + D_p}{0.5(v_x + v_c)} + \frac{\sqrt{2a_d(D_{d1} + D_{d2}) + v_c^2} - v_c}{a_d} + \frac{D_1}{v_o} + t_{ad} \quad (3)$$

式中: $\tau_r^{(d)}$ 为车站最小发车间隔时间, D_{d1} 、 D_{d2} 分别为列车的两个相邻的离去距离; $D_{r,s'}$ 为发车进路 r

最后一个分区 s' 的长度; a_d 为列车区间加速度; t_{ad} 为发车作业附加时间,总计 34 s.

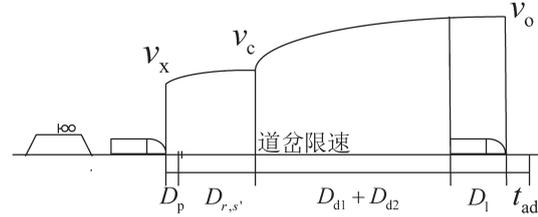


图3 列车发车间隔距离示意图

Fig. 3 Departure interval distance after block division

2 模型及算法

2.1 计算模型

分区优化将不同作业类型的列车与进路类型相对应,在模型构建时将列车间的运行关系转换为进路间的关系,将既有的不同种间隔时间的计算方法统一化处理.通过分区优化对列车在车站运行过程进行精细化分析,精确化计算列车在车站的作业时间.

模型为

$$z = \max \sum_{k=1}^6 \sum_{l_{k,j} \in L} b_{l_{k,j}} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \sum_{l_{k,j} \in L} (g_{r,l_{k,j}} \cdot b_{l_{k,j}}) = 1, \forall k, r \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R} (g_{r,l_{k,j}} \cdot b_{l_{k,j}}) \leq 1, \forall k, j \quad (6)$$

$$t_{l_{k,j}}^{(a)} - t_{l_{k,j-1}}^{(a)} \geq \tau_r^{(a)}, j > 1; t_{l_{k,j}}^{(a)} = 0; g_{r,l_{k,j-1}} = 1; \forall k, r \quad (7)$$

$$t_{l_{k,j}}^{(d)} - t_{l_{k,j-1}}^{(d)} \geq \tau_r^{(d)}, j > 1; g_{r,l_{k,j-1}} = 1; \forall k, r \quad (8)$$

$$t_{s,l_{k,j}}^{(o)} - t_{s,l_{k,j-1}}^{(o)} \geq I_s, j > 1; \eta_{s,l_{k,j}} = \eta_{s,l_{k,j-1}} = 1; \forall k, s \quad (9)$$

$$\max \left[\left(t_{l_{k,j}}^{(a)} - t_{l_{k,j-1}}^{(a)} - \tau_r^{(a)} \right), \left(t_{s,l_{k,j}}^{(o)} - t_{s,l_{k,j-1}}^{(o)} - I_s \right), \left(t_{l_{k,j}}^{(d)} - t_{l_{k,j-1}}^{(d)} - \tau_r^{(d)} \right) \right] \geq t_b, j > 1; \quad (10)$$

$$\eta_{s,l_{k,j}} = \eta_{s,l_{k,j-1}} = 1; g_{s,l_{k,j-1}} = 1; \forall k, s, r$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{k=1}^6 \left[\sum_{l_{k,j} \in L} b_{l_{k,j}} / \sum_{k=1}^6 \sum_{l_{k,j} \in L} b_{l_{k,j}} \right] &= 1, \forall k \\ \sum_{l_{k,j} \in L} b_{l_{k,j}} / \sum_{k=1}^6 \sum_{l_{k,j} \in L} b_{l_{k,j}} &= \rho_k \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} t_{l_{k,j}}^{(a)} &\leq t_{ae} \\ t_{l_{k,j}}^{(d)} &\leq t_{de} \end{aligned} \right., \forall k, j \quad (12)$$

式中: $L = \{l_{k,j} | j \in Z_r, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 为车站的列车集合; $b_{l_{k,j}}$ 为0-1变量, 当列车 $l_{k,j}$ 可以正常运行时, 值为1, 否则值为0; $g_{r,l_{k,j}}$ 为0-1变量, 当列车 $l_{k,j}$ 在占用进路 r 时, 值为1, 否则值为0; $\eta_{s,l_{k,j}}$ 为0-1变量, 当列车 $l_{k,j}$ 在占用进路 s 时, 值为1, 否则值为0; $t_{l_{k,j}}^{(a)}, t_{l_{k,j}}^{(d)}$ 分别为列车 $l_{k,j}$ 的达到时刻和发车时刻; $t_{s,l_{k,j}}^{(o)}$ 为列车 $l_{k,j}$ 开始占用分区 s 的时刻; t_b 为相邻列车最小作业缓冲时间; ρ_k 为第 k 种类型列车数的比例值; t_{ac}, t_{dc} 分别为车站达到作业结束时间和车站发车作业结束时间.

式(4)为目标函数, 即能正常作业的列车数量最大. 式(5)和式(6)表示同一时间内, 一条进路只能被一列列车占用, 且一列列车只能占用一条进路. 可通过这两个约束及进路占用0-1变量表示进路占用关系. 式(7)和式(8)表示相邻运行两列列车的到站时间和发车时间满足最小列车达到间隔时间和最小列车发车间隔时间. 式(9)表示相邻运行的两列列车连续占用同一分区 s 时, 两列列车开始占用该分区的间隔时间不得小于最小分区占用间隔时间. 式(10)表示相邻运行的两列列车在车站作业过程中限制间隔时间要满足最小缓冲时间要求. 式(11)表示不同作业类型实际运行列车数量需满足总体比例约束. 式(12)表示所有列车作业时间要在给定时间段范围内. 此外, 式(7)~式(10)均要满足 $b_{l_{k,j-1}} = b_{l_{k,j}} = 1$ 的约束条件.

2.2 求解算法

设定列车集合中不同类型作业列车的比例, 通过随机选择各列车的作业顺序, 得到某一段时间内可开行的列车数, 计算及分析不同条件下的车站通过能力, 经过多次计算及对比得到最大能力值.

Step 1 根据车站站场平面结构图, 划分车站分区, 并建立分区集合.

Step 2 针对每一次计算, 随机生成符合一定比例的列车集合.

$$\text{Prob} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\};$$

$$A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\};$$

$$\text{For } i = 1 : N_i$$

$$L(1, i) = \text{randsrc}(1, 1, [A, \text{Prob}]); // (\text{注释}) \text{按}$$

Prob中的比例随机生成数列.

End For

Step 3 根据当前选取列车类型建立列车运行进路分配算法, 具体算法步骤为:

(1) 初始化开始时间 T_s , 各进路的占用状态 $z_r = 0, r \in R$, 各分区的占用状态 $z_s = 0, s \in S$.

(2) $j = 1, T = T_s$.

(3) 根据作业类型一致, 优先级最高原则为列车 j 分配进路, 依次计算进路所包含分区的开始占用时间和结束占用时间.

If $k_r = k_j \ \&\& \ z_r = 0 \ \&\& \ \max(y_{k,r})$

$$r_j \leftarrow r; t_{1,j}^{(o)} = T_s; t_{1,j}^{(e)} = t_{1,j}^{(o)} + \frac{D_1}{v_{1,j}};$$

For $s = 2$ to $\text{count}(r_j, s)$

$$t_{s,j}^{(o)} = t_{s-1,j}^{(e)}; t_{s,j}^{(e)} = t_{s,j}^{(o)} + \frac{D_s}{v_{s,j}};$$

End For

End If

转第(5)步.

(4) 选取列车 $j = j + 1$, 根据列车 j 与 $j - 1$ 的作业类型, 判断两列列车的运行瓶颈.

For $s = 1$ to $\text{count}(S)$

$$\text{If } \max_{j \in L, j > 1} t_{s,j-1}^{(e)} < T$$

$$z_s = 0;$$

End If

End For

For $r = 1$ to $\text{count}(R)$

$$\text{If } z_s = 0, (s \in r_s)$$

$$z_r = 0;$$

End If

End For

通过判断瓶颈分区计算间隔时间.

转第(3)步.

(5) 判断总占用时间.

If 列车 j 和列车 $j - 1$ 的瓶颈为发车间隔

$$T' = T - \sum_{s=1}^{\text{count}(r_j)} \frac{D_s}{v_{s,j}} (s \in r_{j,s});$$

End If

If $T > t_{ac}$ 或 $T' > t_{dc}$ 结束计算, 输出结果;

Else 转第(4)步;

End If

3 案例分析

3.1 基础参数设置

某车站分区划分情况如图4所示,具体信息如表1所示.下行车场共23个分区,分区1~7为进站分区,11~17为出站分区,8~10为到发线或正线分

区,18~23为折返分区,其中,分区6和13和折返分区长度小于600 m,不作为间隔时间确定的关键分区.

根据分区信息,整理车站进路信息,得到具体进路信息如表2所示.

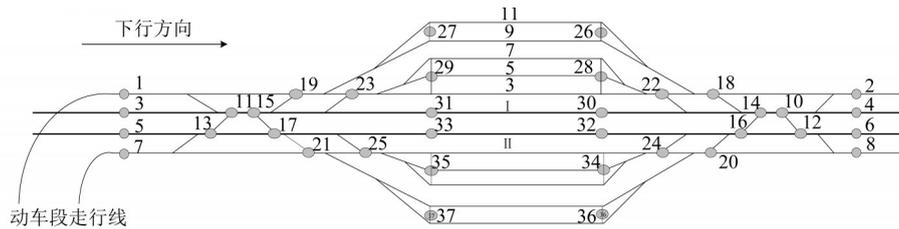


图4 分区节点标识图

Fig. 4 Diagram of block nodes

表1 下行车场分区信息表

Table 1 Block information

分区编号	起始节点	终止节点	长度/m	分区编号	起始节点	终止节点	长度/m	分区编号	起始节点	终止节点	长度/m
A	1	19	623	I	29	28	700	Q	30	4	1 365
B	19	27	744	J	31	30	700	R	23	11	669
C	19	29	693	K	26	18	987	S	19	11	325
D	3	19	692	L	28	18	886	T	13	5	358
E	3	23	934	M	28	22	545	U	11	13	69
F	23	29	382	N	18	2	612	V	16	14	69
G	3	31	1 246	O	22	4	1 023	W	14	4	321
H	27	26	700	P	18	4	682				

表2 进路信息表

Table 2 Route Information

序号	进路编号	进路类型	包含分区	优先级	到发线数	走行时间/min
1	1,2	始发	A,B,H,K,P	4,5	2	18.6
2	3,4,5	始发	A,C,I,M,O	1,2,3	3	18.5
3	6,7,8	通停	D,C,I,M,O	3,4,5	3	5.5
4	9,10	通停	D,B,H,K,P	1,2	2	5.7
5	11,12,13	通停	E,F,I,M,O	6,7,8	3	5.5
6	14	通过	G,J,Q	1	1	2.5
7	15,16,17	终到	D,C,I,C,A	4,5,6	3	18.4
8	18,19	终到	D,B,H,B,A	7,8	2	18.5
9	20,21,22	终到	E,F,I,C,A	1,2,3	3	18.3
10	23,24,25	下行立折	D,C,I,F,R,U,T	3,4,5	3	18.4
11	26,27	下行立折	D,B,H,B,S,U,T	1,2	2	18.5
12	28,29,30	下行立折	E,F,I,F,R,U,T	6,7,8	3	18.3
13	31	上行立折	V,W	1	—	1.8

3.2 计算结果及分析

设置列车速度均为300 km/h,计算时间为60 min,计算次数 $M=500$,缓冲时间设为0.初始不同作业类型列车数量比例{始发、停站、通过、终

到、下行立折、上行立折}为{0.05,0.6,0.2,0.05,0.05,0.05}.总离去距离为2 000 m,列车长度为400 m,安全防护距离为150 m,分区划分后分区目标速度与道岔限速相同.站内启动加速度为0.4 m/s²,

区间加速度为0.7 m/s²,区间制动减速度为0.7 m/s², 站内减速度为0.5 m/s².下行立折按立折间隔时间计算,上行立折列车可按占用相同分区的发车间

隔时间计算且不占用其他股道时间.计算得到不同进路的间隔时间,如表3所示.

表3 列车作业间隔时间表
Table 3 Interval time for different routes

间隔时间类型	关键分区	进路编号	间隔时间/min
到达间隔	A	1,2,3,4,5,31,32,33,34,35	3.1
到达间隔	D	6,7,8,9,10,15,16,17,18,19,23,24,25,26,27	3.1
到达间隔	E	11,12,13,20,21,22,28,29,30	3.3
发车间隔	O	3,4,5,6,7,8,11,12,13, 31	2.8
发车间隔	P	1,2,9,10, 31	2.7
立折间隔	S(D)	26,27	1.6
立折间隔	R(E)	23,24,25,28,29,30	1.6

(1) 计算次数范围内的最优方案.

最优方案可在1 h内随机产生17列,其中,停站10列,通过3列,始发、终到、下行立折和上行立折各1列.各列车占用分区情况,运行顺序及占用

进路情况如图5所示.该方案所有列车进站总占用时间59.5 min,总能力值17列/h;到达间隔时间最小3.1 min,最长7.4 min,平均3.5 min;列车在车站的服务频率为13列/h.

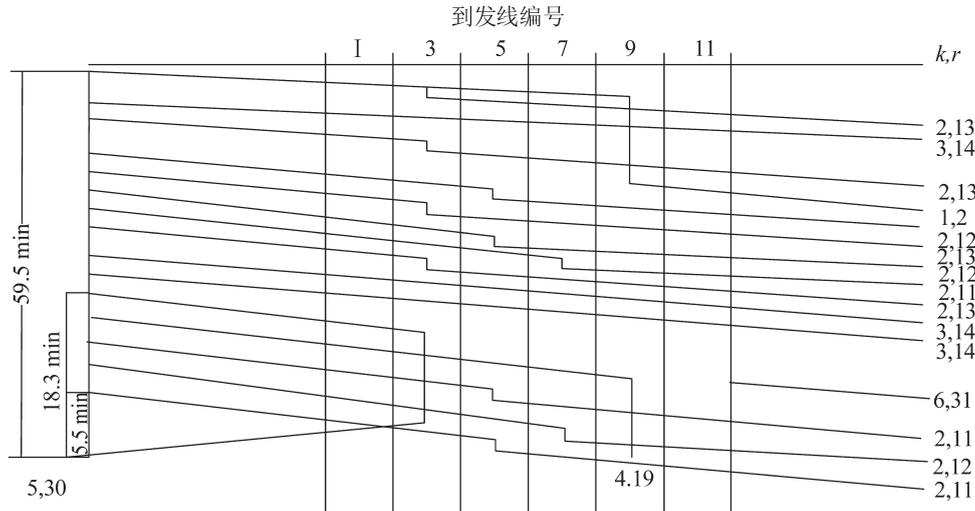


图5 能力最优方案

Fig. 5 Optimal carrying capacity scheme

(2) 不同作业类型列车数量比例对能力的影响分析.

不同作业类型列车数量比例发生变化时,对能力产生不同的影响.以下方案中 $g = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$.

方案1 不同作业类型列车数量比例为 $\{0.05 + (g - 1) \times 0.05, 0.6 - (g - 1) \times 0.05, 0.2, 0.05, 0.05, 0.05\}$.减少停站列车,增加始发列车,车站通过能力的变化趋势不明显.

方案2 不同作业类型列车数量比例为 $\{0.05,$

$0.6 - (g - 1) \times 0.05, 0.2, 0.05 + (g - 1) \times 0.05, 0.05, 0.05\}$.减少停站列车,增加终到列车,能力值的变化趋势也不明显.

方案3 不同作业类型列车数量比例为 $\{0.05, 0.6 - (g - 1) \times 0.05, 0.2, 0.05, 0.05 + (g - 1) \times 0.05, 0.05\}$.减少停站列车,增加下行立折列车,能力值随着 g 的增长呈阶梯式下降.

计算结果如图6所示,案例中到发线数量较多,列车连续办理客运作业时到发线能力充足,故对车站通过能力的影响不大.下行立折列车增加

时会产生交叉进路:在下行立折列车到达时产生正常的到达间隔时间,在进行立折作业时因交叉进路产生立折间隔时间,故下行立折列车数量不断增加时,车站的通过能力逐渐下降。

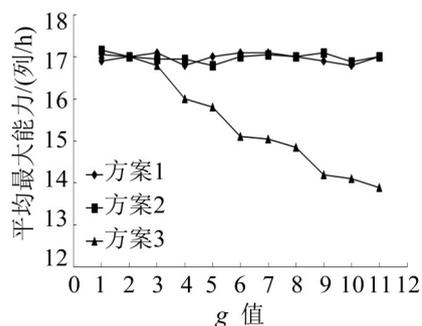


图6 结果分析

Fig. 6 Result analysis

分区优化前:列车按既有运行方式计算,到达间隔4.1 min,发车间隔3.5 min;相同列车作业类型比例条件下,单位时间的通过能力为13列/h.同等条件下,分区优化后,车站通过能力可提升30.8%。

4 结论

本文采用分区优化方法解决高铁客运站长咽喉区对通过能力的影响.该方法有效地缩短了列车间隔时间,在不影响其他基础设施及运输组织条件的前提下,使车站通过能力提升30.8%.本文方法需要通信信号及供电部门的配合及设施改造,成本较大,主要适用于新线新站的设计和修建.未来的研究中,将更充分地论述本文方法对其他专业部门的具体需求和改造方法.此外,需要结合区间的列车运行组织,从线路角度分析区间通过能力对本文方法的影响.

参考文献:

- [1] 张岳松,田长海,姜昕良,等.高速铁路列车间隔时间的计算方法[J].中国铁道科学,2013,34(5):120-125. [ZHANG Y S, TIAN C H, JIANG X L, et al. Calculation method for train headway of high speed railway[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 120-125.]
- [2] LINDNER T. Applicability of the analytical UIC code 406 compression method for evaluating line and station capacity[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2011, 1(1): 49-57.
- [3] 王高磊.基于列车运行图压缩加密的铁路通过能力计算方法研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2019. [WANG G L. Research on calculation method of railway passing capacity based on train working diagram compression and encryption[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019.]
- [4] HANSEM I A. Review of planning and capacity analysis for stations with multiple platforms—case stuttgart 21[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2017(6): 313-330.
- [5] CHIEN C F, DOU R L, FU W H. Strategic capacity planning for smart production: Decision modeling under demand uncertainty[J]. Applied Soft Computing, 2018 (68): 900-909.
- [6] BURDETT R L. Optimization models for expanding a railways theoretical capacity[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 251(3): 783-797.
- [7] ARMSTRONG J, PRESTON J. Capacity utilisation and performance at railway stations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2017(7): 187-205.
- [8] WANG J F, YU Y, KANG R W, et al. A novel space-time-speed method for increasing the passing capacity with safety guaranteed of railway station[J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, DOI: 10.1155/2017/6381718.